

100 Hz 重复频率脉冲中红外 HF 化学激光器

黄超*, 黄珂, 易爱平, 朱峰, 马连英, 安晓霞

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 基于自动紫外预电离的放电引发方式, 研制出紧凑型闭环高重复频率非链式 HF 化学激光器。该激光器采用非对称电极结构, 放电腔室的尺寸为 12 mm×17 mm×460 mm。为了实现重复频率运行过程中放电区气体的快速置换, 循环气体垂直于光轴流过放电区, 气体流速约为 9 m/s。当总气压为 14 kPa 时, 在摩尔分数分别为 92% 和 8% 的 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体中, 100 Hz 重复频率脉冲 HF 激光器的输出功率为 50 W。

关键词 激光器; 中红外激光; HF 化学激光器; 放电引发; 紫外预电离

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0201002

A Mid-Infrared Pulsed HF Chemical Laser with 100 Hz Repetition Rate

Huang Chao*, Huang Ke, Yi Aiping, Zhu Feng, Ma Lianying, An Xiaoxia

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract A compact, closed-circle, high repetition frequency non-chain HF chemical laser is demonstrated based on the electric-discharge ignition mode via self-acting ultraviolet pre-ionization. A pair of asymmetric electrodes defines a 12 mm×17 mm×460 mm discharge volume. The circle gas flow is forced through this discharge volume to flush spent gas and replace it with fresh gas. The circulating gas flow in the vertical direction to the optical axis and the flow rate is 9 m/s. When the total gas pressure is 14 kPa, an average power of 50 W is realized with 100 Hz repetition rate in the gas mixture with mol-fractions of 92% SF₆ and 8% C₂H₆.

Key words laser; mid-infrared laser; HF chemical laser; discharge ignition; ultraviolet pre-ionization

OCIS codes 140.1550; 140.3070; 140.4130; 000.1570

1 引 言

HF 化学激光器的中心波长为 2.7 μm^[1-2], 在激光医学、激光光谱、大气光学与检测、光电对抗、激光抽运等领域有着良好的应用前景^[3-9], 其中非链式 HF 激光器在可控性和小型化方面具有明显优势, 且可实现高峰值功率脉冲输出。1967 年, Deutsch^[10]首次获得单脉冲放电引发非链式 HF 化学激光输出, 引起了世界各国的广泛关注, 其也是现阶段倍受关注的中红外激光源之一。

美国、俄罗斯、法国、英国、日本等国家的学者对放电引发非链式 HF 激光器进行了大量研究, 早期研究主要集中在激励过程的激光化学和激光光谱学, 以及新型放电结构和激光工作介质等方面^[11-14]。

20 世纪 90 年代后, 重复频率运行逐渐成为关注重点, Brunet 等^[15]研制了高平均功率的重复频率脉冲 HF 激光器, 平均功率在重复频率为 110 Hz 时达到了 500 W。Lacour^[16]获得重复频率为 12 Hz、单脉冲能量为 20 J 的 HF 激光输出。Harris 等^[17]采用闭环方式研制了 1 kHz 量级的 HF 激光器, 获得了重复频率为 1.5 kHz、平均功率为 2 W 的 HF 激光输出。Velikanov 等^[18]研制了一台运行频率为 1.2 kHz、平均功率为 25 W 的 HF 激光器, 并且通过对循环系统的优化, 在 2009 年将该系统的运行频率提高到 2 kHz, 平均功率提高至 40 W。

2000 年后, 国内开始进行放电引发脉冲 HF 化学激光器技术的研究, 已获得焦耳级单脉冲 HF 激光输出^[19-22], 但是放电引发非链式 HF 化学激光器的重复

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-10-30; 录用日期: 2018-11-11

基金项目: 国防科技创新特区项目资助课题、国家重点实验室基金(SKLLIM1610)

* E-mail: huangchao@nint.ac.cn

频率还较低^[23-25], 100 Hz 重复频率运行的非链式 HF 激光器鲜有报道。本文采用三电极触发管型气体火花开关, 利用自动紫外预电离的放电引发方式, 建立了闭环放电引发非链式重复频率脉冲 HF 激光器, 并实现了 100 Hz 重复频率的 HF 激光输出。

2 激光装置

放电引发非链式 HF 激光器采用气体火花开关控制的横向放电方式获得高功率输出, 利用激光介质气体闭环流动实现激光器重复频率运行。该激光器由放电引发源、大功率气体火花开关、气体循环系统、充电电源和触发器组成, 其外形结构如图 1 所示。

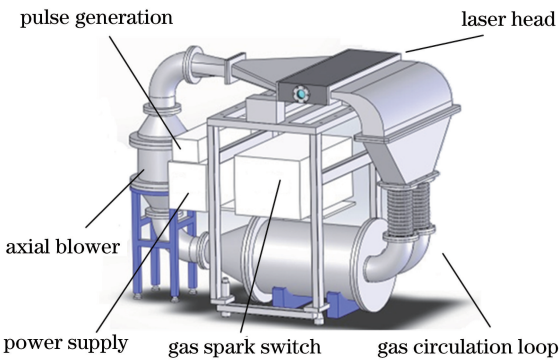


图 1 100 Hz 重复频率放电引发非链式 HF 化学激光器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of electric-discharged non-chain HF chemical laser with 100 Hz repetition rate

2.1 放电引发源

激光器的放电引发源采用文献[19]中提及的电容储能电荷转移型电路及紫外自动预电离结构, 在其基础上对放电区结构进行优化设计, 使放电引发源的结构更加紧凑。主电极选用一对非对称长条形不锈钢电极, 高压电极为 Chang 氏电极, 地电极为两边倒圆角的平板结构, 放电增益区的尺寸约为 12 mm × 17 mm × 460 mm。预电离电极位于高压电极两侧, 由 24 对不锈钢针组成, 针尖与高压电极的距离均为 2 mm, 另一端通过峰化电容 C_p 耦合接地, C_p 表示电容为 400 pF 的高压陶瓷电容器。激光器的储能电容器 C_0 由 8 个 10 nF 的无感陶瓷电容器并联组成。

2.2 大功率气体火花开关

激光器的开关为三电极触发管型气体火花开关, 结构如图 2 所示。为了使极间电场尽量均匀, 提高开关工作稳定性, 主电极采用类半球形结构, 电极间隙为 4 mm。触发电极采用冠状结构, 完全置于触发孔径内, 其顶部刚好与地电极表面齐平。开关

绝缘筒为内径 $\varphi 90$ mm、高 70 mm 的有机玻璃筒。本实验的开关工作气体压强为 0.4 MPa, 保证开关具有良好的关断性能, 可在 20~30 kV 电压范围内实现 100 Hz 重复频率运行。

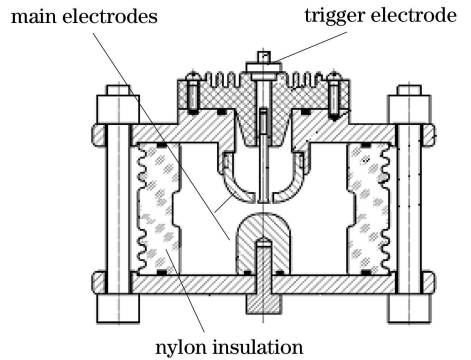


图 2 火花隙开关结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of spark gap switch

2.3 气体循环系统

为了消除脉冲放电过程对放电区混合气体的影响, 实现激光器高重复频率运行, 激光器采用轴流风机驱动混合气体闭环流动, 轴流风机的转速为 8000 r/min, 最大的气体流量为 4800 L/min, 放电区气体流速可达到 9 m/s, 可满足激光器 100 Hz 重复频率运行中脉冲间隔时间内完成放电区气体 2~3 倍置换率的需求。图 3 所示为轴流风机转速为 8000 r/min 时放电引发非链式 HF 激光器放电区轴向气体流速分布曲线。

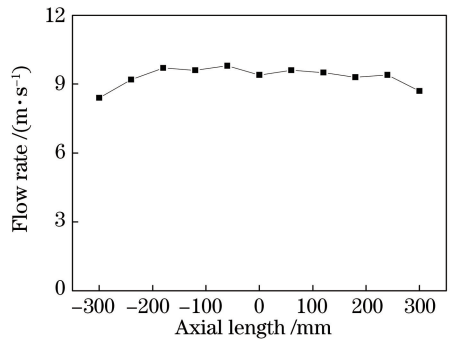


图 3 激光器放电区的流场分布

Fig. 3 Flow rate distribution in discharge region of laser

2.4 谐振腔

激光器采用正支虚共焦非稳腔提高输出激光的光束质量, 正支虚共焦非稳腔由一对凹面反射镜和凸面反射镜组成, 放大率 $M = 3$, 其光路布局如图 4(a) 所示。凹面反射镜和凸面反射镜均为镀金全反镜, 小孔光阑通光孔径在 2~20 mm 可调, 凸透镜焦距为 2 m。实验中采用热敏纸记录激光光斑, 在靠近激光器侧凸透镜旁记录激光束的近场光斑, 结

果见图 4(b), 可以看到光斑阴影部分可能由腔内电极遮挡所致; 在凸透镜远离激光器侧的焦点处测量激光束的远场光斑, 如图 4(c) 所示, 并计算得出放电引发非链式 HF 激光器的衍射极限倍数 $\beta=2.37$ 。

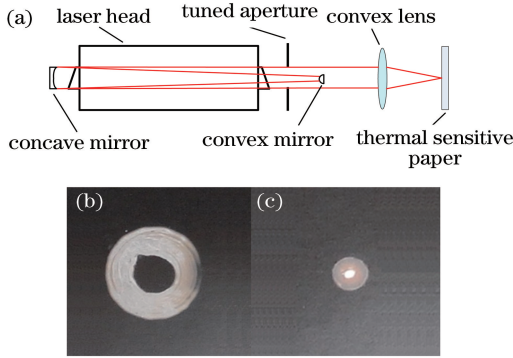


图 4 非稳腔结构示意图及光斑。(a)非稳腔结构;
(b)近场光斑;(c)远场光斑

Fig. 4 Schematic of unstable cavity and beam pattern.
(a) Layout of unstable cavity; (b) near-field spot
(c) far-field spot

2.5 电源和触发器

激光器的外部电源为芜湖国睿兆伏电子科技有限公司研制的高压恒流电源, 充电电压在 0~30 kV 内可调, 最大电流为 2 A, 最大功率为 25 kW, 重复频率在 0~200 Hz 范围内可调。高压触发器采用成都森远科技有限公司生产的高重复频率脉冲发生器, 其输出电压呈正极性, 在 20~50 kV 内可调, 前沿小于 40 ns, 脉冲宽度约为 50 ns, 最大运行频率为 500 Hz。

3 激光输出特性

六氟化硫(SF₆)气体安全无毒, 作为 F 原子的

施主可以获得较高的激光能量和电学效率; 乙烷(C₂H₆)气体可以有效抑制气体放电的不稳定性, 增强激光器重复频率运行稳定性。100 Hz 重复频率放电引发非链式 HF 激光器采用 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体作为工作介质, 气体摩尔分数之比 $n_{SF_6}:n_{C_2H_6}=92:8$, 可在很宽的气压范围(8~20 kPa)内获得激光输出, 图 5 所示为不同总气压条件下激光能量和效率随电压的变化曲线。1) 同一气压条件下, 激光能量随工作电压的增大而增加, 且达到某一工作电压后激光能量增速变缓, 但在激光器的工作电压范围内没有出现激光能量大幅降低的现象。这主要是因为增加工作电压, 放电强度增大, F 原子产额增加, 激光能量增大; 然而电压达到一定数值后, 激光器出现电弧放电, 放电沉积到气体中的能量沉积效率降低, 激光能量增速变缓; 另外非对称电极的应用与激光介质气体的优选, 提高了激光器的放电稳定性, 即使在高电压、低气压条件下, 电弧放电亦没有融入体放电过程导致激光能量大幅降低。2) 激光器的每个电压均存在一个最佳工作气压, 使得该电压条件下激光输出能量最高, 效率最大; 且激光器的最佳工作气压随电压增大而增大。当电压为 21 kV 时, 其最佳工作气压 P 为 8 kPa, 对应的激光能量为 477 mJ, 效率为 2.7%; 电压增至 29 kV 时, 最佳工作气压变为 14 kPa, 相应的激光能量为 796 mJ、效率为 2.54%。由于激光器的电源电压受限, 当气压大于 14 kPa 时, 激光器无法运行在最佳状态, 效率下降, 当气压为 20 kPa 时, 激光工作在 29 kV 电压下的激光能量约为 633 mJ、效率只有 1.88%。因此, 为获得高功率、高效率 HF 激光, 在所述实验条件下, 放电引发脉冲 HF 激光适合的气压为 14 kPa。

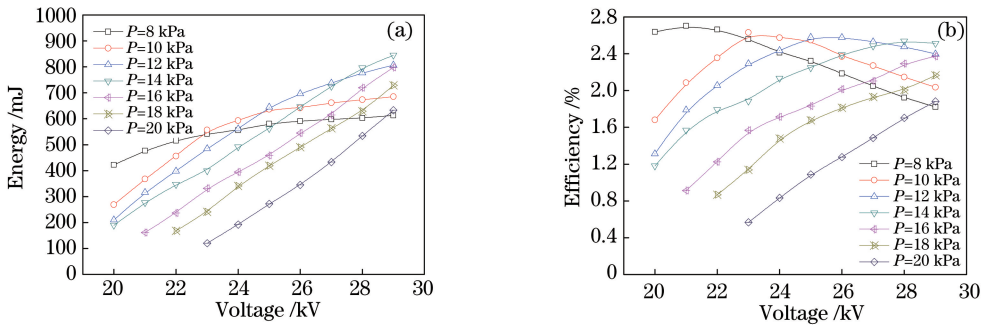


图 5 不同气压下的激光能量和电效率。(a)激光能量;(b)电效率

Fig. 5 Pulse energy and electric efficiency under different gas pressures. (a) Laser energy; (b) electric efficiency

4 重复频率实验结果

为了实现高功率的 100 Hz 重复频率 HF 激光

输出, 选择气压为 14 kPa、电压为 29 kV, 此时气体循环系统中轴流风机的转速选择 8000 r/min, 对应的激光器放电区的气体流速为 9 m/s。激光器连续

输出 50 个脉冲的能量曲线如图 6(a)所示,与之对应的放电波形见图 7(a)。由图 6(a)可知,当气压为 14 kPa、电压为 29 kV 时,激光器 100 Hz 重复频率运行过程中激光能量不断下降。其放电波形表明,重复频率运行过程中,除初始几个脉冲外,其他脉冲放电过程均出现了电弧,且电弧融入了体放电过程,融入程度随着重复频率运行时间的增加而不断增大,使得后续脉冲体放电的持续时间不断减小,激光脉冲宽度不断减小,激光能量不断降低。分析认为:工作电压为 29 kV 所对应的激光器放电区的储能密度约为 358.5 J/L,其折合气压能量密度约为 25.6 J/(L·kPa),比文献[12]中 HF 激光器的折合气压能量密度[14.4 J/(L·kPa)]大得多,激光器放

电更加剧烈,脉冲间隔内气体不能完全恢复,导致后续脉冲放电状态变差,电弧放电不断提前,激光能量不断降低。本实验还通过降低激光器工作电压来改善激光器重复频率的放电状态,图 6(b)、(c)和图 7(b)、(c)所示分别为工作电压 U 为 27 kV 和 25 kV 时,激光器重复频率为 100 Hz 的激光能量曲线和放电波形。实验结果表明:减小工作电压,激光器的放电状态逐渐改善,当工作电压减小到 25 kV 时,重复频率运行激光器的放电过程中未观测到电弧放电现象,能量稳定性明显改善,峰峰波动可小于 $\pm 4\%$,100 Hz 重复频率脉冲 HF 激光的平均功率约为 50 W,其折合气压能量密度约为 18.9 J/(L·kPa)。

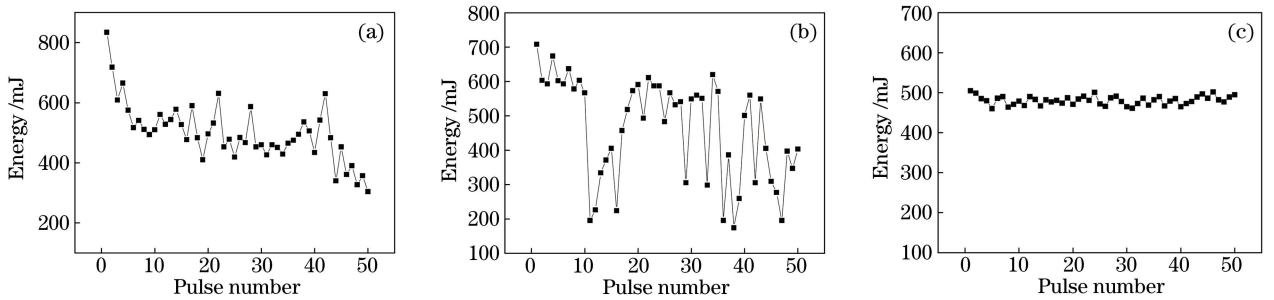


图 6 不同电压下 100 Hz 重复频率脉冲 HF 激光器的能量曲线。(a) $U=29$ kV; (b) $U=27$ kV; (c) $U=25$ kV

Fig. 6 Pulse energy curves of HF laser with 100 Hz repetition rate under different voltages.

(a) $U=29$ kV; (b) $U=27$ kV; (c) $U=25$ kV

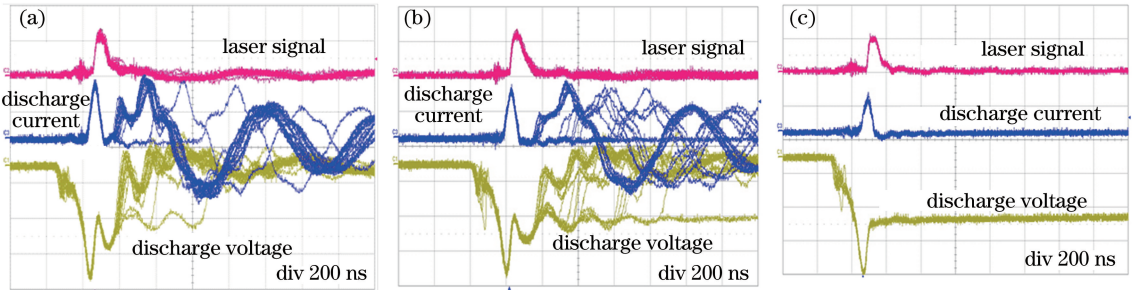


图 7 不同电压下 HF 激光器 100 Hz 重复频率运行的叠加波形。(a) $U=29$ kV; (b) $U=27$ kV; (c) $U=25$ kV

Fig. 7 Overlaid waveforms of HF laser with 100 Hz repetition rate under different voltages.

(a) $U=29$ kV; (b) $U=27$ kV; (c) $U=25$ kV

5 结 论

利用非对称电极和紫外预电离电路研制出紧凑型闭环 100 Hz 重复频率脉冲 HF 激光器。选择摩尔分数之比为 92:8 的 SF_6 和 C_2H_6 混合气体作为工作介质,在较宽的气压范围(8~20 kPa)内实现了 HF 激光输出,获得激光能量随气压、电压的变化规律;激光器的最大脉冲能量为 845 mJ,最高效率为 2.7%,激光光束衍射极限倍数 β 为 2.37。

实现了 100 Hz 重复频率 HF 激光输出,获得了

该重复频率下 HF 激光输出能量稳定性随电压的变化规律;通过减小电压,降低激光器放电区的折合气压能量密度,在气体置换速率为 9 m/s、气体介质气压为 14 kPa、工作电压为 25 kV 条件下,激光器 100 Hz 重复频率运行的平均能量约为 50 W,效率约 1.92%,激光能量波动小于 $\pm 4\%$ 。

参 考 文 献

[1] Guo J Z, Wang J, Zhao H T, *et al.* Output spectrum of continuous wave hydrogen fluoride laser

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021404.
- 郭建增, 王杰, 赵海涛, 等. 连续波氟化氢激光输出光谱特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021404.
- [2] Wang J, Guo J Z, Li S H, *et al.* Study on gain characteristic of long wave spectral line in hydrogen fluoride laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0411002.
- 王杰, 郭建增, 李少华, 等. 氟化氢激光长波谱线增益特性研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0411002.
- [3] Rickwood K R. A comparison of methods of electrically exciting small pulsed HF lasers suitable for medical applications[J]. *Optics Communications*, 1997, 136(5/6): 480-486.
- [4] Kelley P L, McClatchey R A, Long R K, *et al.* Molecular absorption of infrared laser radiation in the natural atmosphere [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, 8(2): 117-144.
- [5] White K O, Watkins W R, Bruce C W, *et al.* Water vapor continuum absorption in the 3.5-4.0- μm region [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(17): 2711-2720.
- [6] Bravy B G, Vasiliev G K, Agroskin V Y, *et al.* Recognition of composition and of microphysical characteristics of aerosol clouds in multifrequency sounding with DF laser-based lidar system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4882: 394-400.
- [7] Andreev S N, Firsov K N, Kazantsev S Y, *et al.* Electric signal generated under action of HF laser pulse on surface of a water column [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(1): 21-25.
- Andreev S N, Firsov K N, Kazantsev S Y, 等. HF 激光脉冲与水柱表面相互作用产生电信号[J]. *中国光学*, 2011, 4(1):21-25.
- [8] Firsov K N, Gavrishchuk M, Kazantsev S Yu, *et al.* Spectral and temporal characteristics of a ZnSe:Fe²⁺ laser pumped by a non-chain HF(DF) laser at room temperature[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(12): 125004.
- [9] Kong X Y, Ke C J, Hu C F, *et al.* 65 mJ Fe²⁺:ZnSe mid-infrared laser at room temperature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101011.
- 孔心怡, 柯常军, 胡呈峰, 等. 65 mJ 室温 Fe²⁺:ZnSe 中红外激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0101011.
- [10] Deutsch T F. Molecular laser action in hydrogen and deuterium halides [J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 10(8): 234-236.
- [11] Voignier F, Gastaud M. Improved performance of a double discharge initiated pulsed HF chemical laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25(11): 649-650.
- [12] Marcus S, Carbone R. Gain and relaxation studies in transversely excited HF lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1972, 8(7): 651-655.
- [13] Apollonov V V, Firsov K N, Kazantsev S Y, *et al.* High-power nonchain HF (DF) lasers initiated by self-sustained volume discharge [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3574: 374-385.
- [14] Puech V, Prigent P, Brunet H. High-efficiency, high-energy performance of a pulsed HF laser pumped by phototriggered discharge [J]. *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1992, 55(2): 183-185.
- [15] Brunet H, Mabru M, Vannier C. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 1810: 494-498.
- [16] Lacour B. High-average-power HF/DF lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4971: 9-17.
- [17] Harris M R, Morris A V, Gorton E K. Closed-cycle 1-kHz-pulse-repetition-frequency HF (DF) laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3268: 247-252.
- [18] Velikanov S D, Evdokimov P A, Zapol'sky A F, *et al.* Pulse periodic HF (DF)-laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7131: 71310V.
- [19] Huang K, Tang Y, Yi A P, *et al.* Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1026-1029.
- 黄珂, 唐影, 易爱平, 等. 非链式电激励脉冲 HF 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1026-1029.
- [20] Zhu F, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401002.
- 朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲 HF 激光光束质量优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401002.
- [21] Ke C J, Wan C Y, Zhou J W, *et al.* High peak power pulsed HF laser[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 480-481.
- 柯常军, 万重怡, 周锦文, 等. 高峰值功率脉冲氟化氢激光器[J]. *激光技术*, 2004, 28(5): 480-481.
- [22] Wang Q S, You L B, Yin G Y, *et al.* Discharge-pumped joule-level HF laser with ultraviolet spark pre-ionization [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(8): 081003.
- 王庆胜, 游利兵, 尹广玥, 等. 焦耳级放电激励紫外预电离 HF 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28

- (8): 081003.
- [23] Huang K, Yi A P, Zhu F, *et al.* Discharge initiated non-chain high power repetitively pulsed HF/DF laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 041010.
黄珂, 易爱平, 朱峰, 等. 放电引发的非链式高功率重复频率 HF/DF 激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 041010.
- [24] Tang Y, Huang K, Yi A P, *et al.* Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0202004.
唐影, 黄珂, 易爱平, 等. 放电激励重复频率 HF 激光器稳定输出实验研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0202004.
- [25] Ke C J, Zhang K H, Sun K, *et al.* A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 36-38.
柯常军, 张阔海, 孙科, 等. 重复频率放电引发的脉冲 HF(DF)激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 36-38.